

막구조를 이용한 환경친화적 담수저장기술 - 수치모델

오영민*

1. 서론

하구부근에서는 일반적으로 염수의 영향으로 하천수를 농업용수으로 사용하기가 어려운 실정이므로 먼 지역으로부터 파이프를 통하여 용수공급을 하고 있는데 많은 비용이 소요된다. 따라서 하구부근에서는 적은 비용으로 해수의 유입을 효과적으로 차단하여 하천수를 직접 취수할 수 있는 방안 마련이 시급하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 기름 확산을 차단하거나 해양 준설시에 이용되는 막구조물을 담수 저장용 탱크로 이용하는 방안을 강구하였다.

담수저장 원리는 일단 초기에 막구조물 사이에 하천수가 저장되면 밀도차에 의하여 해수는 아래로 흐르고 담수는 위에 머문다는 것이다. 물론 바람이나 파랑에 의하여 구조물 위로 해수가 월파하여 오염될 수도 있으나 월파를 방지할 수 있다고 가정하면 담수는 오직 해수와의 경계층에서의 혼합에 의하여 오염이 된다. 이 시스템은 고정식이 아니라 설치와 철수가 매우 용이한 부유식이며 하부를 통한 흐름이 허용되므로 흐름의 차단에 의한 오염의 가능성도 거의 없다고 할 수 있다. 따라서 경계층에서의 혼합속도가 빠르지 않다면 이러한 시스템은 해수의 영향으로 용수공급에 어려움을 겪는 하구지역에 유용하게 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

경계층에서의 난류혼합에 관한 연구는 Richardson(1920)과 Keulegan(1949) 등에 의하여 처음으로 시작되었다. 그 이후 Ellison과 Turner(1959) 및 Chu와 Baddour(1984)가 염수 위로 흐르는 담수에 의한 난류 혼합에 대하여 연구하였으며 Rajaratnam과 Subramanyan(1986)은 온수와 냉수의 밀도차를 이용하여 온수의 제트유속에 의한 内部跳水(Internal jump)를 재현하였는데 이들의 연구결과는 실험조건의 차이 등에 의하여 상호 일치하지 않았다. Christodoulou(1986)와 Atkinson(1988)은 Richardson 수, R_i 를 이용하

* 한국해양연구소 연안·항만공학연구센타 선임연구원

여기서 기왕의 연구결과를 4개의 영역으로 구분하여 각 영역에 대한 혼합률을 수식화하였으며 이를 하나의 도표로 완성하였다. 밀도가 다른 두 유체 사이에서의 R_i 는 다음 식으로 나타낸다.

$$R_i = \frac{g\Delta\rho d}{\rho_0 U^2} \quad (1)$$

여기서 g 는 중력가속도, ρ_0 는 기준이 되는 유체의 밀도로써 보통 흐르는 유체를 대상으로 한다. $\Delta\rho$ 는 두 유체간의 밀도차, d 는 움직이는 유체층의 두께 그리고 U 는 유속이다.

본 연구에서는 밀도 경계층이 층간의 교환을 어렵게 한다는 원리를 이용하여 조석에 의한 해수의 영향을 받는 하천에서 바닥이 없는 단순한 탱크 형태의 막구조물을 이용하여 하천수를 해수와 분리하여 저장하는 사업의 첫 단계로서 저장된 담수와 유입해수와의 반응형태 및 혼합속도 등을 연구하였다. 이를 위하여 FLUENT라는 상업용 프로그램을 이용하여 혼합현상을 재현하고 이 결과를 기존의 이론식이나 실험식과 비교하여 수치모델의 적용성을 검증하였는데 이 프로그램은 단일유체의 난류흐름은 물론이고 성질이 서로 다른 둘 이상의 유체의 혼합특성도 재현할 수 있으며 공간적으로 3차원 해석도 가능하다.

2. 수치모델, FLUENT

FLUENT는 유체의 흐름, 열전달 및 화학반응 등을 모형화 할 수 있도록 만들어진 프로그램이다. 이를 이용하면 복잡한 계산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 문제를 쉽게 해석할 수 있다. 따라서 FLUENT는 항공기 설계, 다굴절 파이프 설계, 건축설계 등을 위한 흐름해석에 폭넓게 적용할 수 있다. FLUENT는 단일위상(Single phase) 뿐 아니라 2개 이상의 복합위상(Multiple phase)간의 상호작용도 해석할 수 있다. 복합위상의 경우는 위상간의 혼합을 허용하느냐 하지 않느냐에 따라 다른 모델을 사용하는데 전자의 경우는 Eulerian 모델, 후자의 경우는 Volume of Fluid(VOF) 모델이 사용된다. VOF 모델은 물과 기름 혹은 공기와 물과 같이 서로 섞이지 않는 위상간의 상호작용을 해석하는데 적합하고 Eulerian 모델은 본 연구에서 다루고자 하는 주제와 같은 담수와 염수의 혼합 등의 해석에 적합하다고 할 수 있다.

3. 담수와 염수의 혼합

3.1 입력경계조건

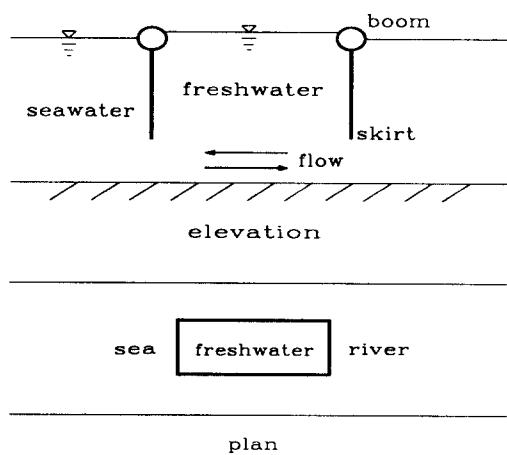


그림 1 담수저장 탱크의 개념도

R_i 를 0.3, 3, 12의 세 가지로 하여 사류와 천이흐름 (1)에서 두 유체간의 밀도차 $\Delta\rho = 30 \text{ kg/m}^3$, 움직이는 유체층의 두께 $d = 40 \text{ cm}$ 로 하고 부위상인 염수입자의 직경은 0.1 cm로 하여 각 조건에 대한 혼합속도를 계산하였다. 탱크의 크기는 길이 1.6 m, 높이 2.0 m이며 계산격자간격은 길이방향으로 12등분, 연직 방향으로 20등분하였다.

3.2 적용 및 결과

그림 2는 천이흐름조건인

$R_i = 3$ 일 때의 염수의 혼합현상을 나타낸 연직단면도이다. 이 그림에서 흐름발생부터 25초 경과한 후의 혼합현상을 나타내는 그림 3(a)에서는 흐름의 일부가 출구부분의 벽과 충돌하여 벽을 타고 위로 올라가 담수와 혼합되는 현상을 보여준다. 그러다가 시간이 더 지나면서 탱크 내부로 진입한 흐름이 반대편 벽으로 반사되어 탱크내의

담수를 저장하기 위한 탱크 내부에서의 혼합현상을 재현하기 위하여 그림 1과 같은 모형을 상정하였다. 실제문제에 있어서 그림의 왼쪽은 바다와 접하고 있는 강의 하류로 오른쪽은 상류로 가정할 수 있는데 조석작용에 의하여 해수가 강의 상류로 진행함으로써 탱크 내부의 담수와 혼합된다. 이러한 현상을 FLUENT를 이용하여 재현할 수 있는지를 검토하기 위하여 초기에 담수로 가득 차 있는 영역에 해수를 도입하여 유체간의 혼합현상을 재현하였다. 다양한 흐름조건에서 탱크내의 혼합현상의 변화를 살펴보기 위하여 Richardson 수

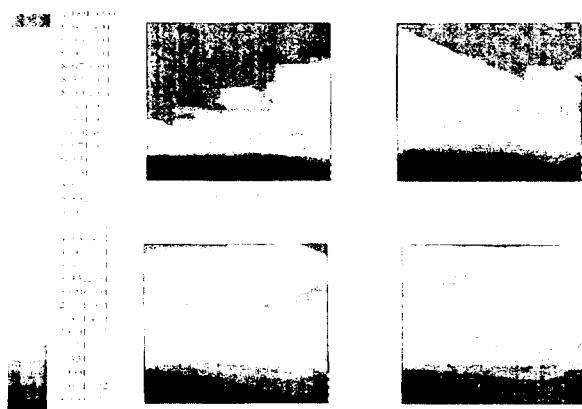


그림 2 염수의 유입에 따른 담수와 염수의 혼합 현상(담수의 체적비)

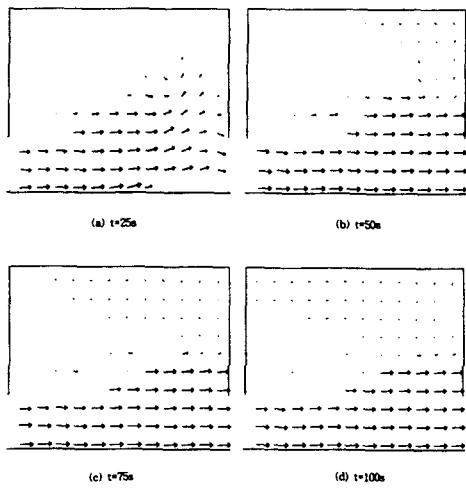


그림 3 탱크내부의 염수의 유속벡터도

혼합을 가속화시키는데 이는 혼합이 밀도경계층에서의 확산에 의하여 이루어진다기보다는 주로 와류에 의하여 이루어진다고 할 수 있다. 이러한 설명을 뒷받침하기 위하여 탱크내부의 염수의 유속벡터를 그림 3에 제시하였다. 이러한 현상은 유속이 빠를수록 두드러지며 느릴수록 약해지는데, 혼합현상은 Foo 등(1995)의 수리실험결과에서 알 수 있듯이 초기유속에 비해 유속이 작아지는 탱크내부의 어느 일정한 수심에서 밀도경계층을 형성한 후 서서히 위상간의 물질교환이 이루어지는 형태로 변환된다. 따라서 밀도경계층의 위치는 유속이 작아져서 어느 일정치에 다다를 때 형성되는데 유속이 빠를수록 수면 가까이에서 형성되고 느릴수록 탱크 저면에 형성된다.

4. 결론 및 차후 연구과제

염수의 영향을 받는 하구나 연안에서 담수를 저장하기 위한 막구조물을 설치하고자 하는 사업의 성공을 위해서는 우선 구조물 내부에서 난류흐름에 의한 염수의 혼합정도를 파악하는 것이 선결과제이다. 이를 위하여 난류흐름을 해석할 수 있는 FLUENT라는 상업용 프로그램을 난류혼합문제에 적용할 수 있는지의 여부를 확인하고 차후에 실제 문제에 이용하기 위하여 난류혼합을 재현하였으며 이를 실험치 및 이론치와 비교하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 혼합속도는 흐름조건 및 부위상의 입자크기와 밀접한 관계가 있는데 흐름조건의 경우는 사류일 때가 상류나 천이흐름보다는 이론치나 실험치에 근접하였는데 이는 수치모델이 유속이 약할 경우 탱크내의 어느 지점에서 밀도경계층을 이루면서 천천히 물질교환이 이루어지는 현상을 재현하는데 취약하기 때문에 유속이 작은 경우에는 유속이 큰 경우보다 상대적으로 혼합속도가 빨라지는 현상이 발생한다.

2) FLUENT는 단일위상에서 복합위상으로 위상의 수가 증가하면 계산시간도 엄청나게 증가하고 같은 위상수를 갖는 복합위상모델이라도 위상간의 혼합을 허용하는 Eulerian 모델이 허용치 않는 VOF 모델보다 계산시간이 훨씬 많다. 따라서 Eulerian 복

합위상모델의 경우는 격자수나 계산영역의 크기 등을 결정할 때 계산시간을 줄이기 위해서 세심한 고려가 필요하다.

5. 참고문헌

- Atkinson, J.F. (1988). "Note on interfacial mixing in stratified flows," *J. Hyd. Res.*, Vol.206, No. 1, pp.27-31.
- Christodoulou, G.C. (1986). "Turbulent mixing in stratified flows," *J. Hyd. Res.*, Vol.24, No.2, pp.77-02
- Chu, V.H. and Baddour, R.E. (1984). "Turbulent gravity stratified shear flows," *J. Fluid Mech.* Vol.138, pp.353-378.
- Ellison, T.H. and Turner J.S. (1959). "Turbulent entrainment in stratified flows," *J. Fluid Mech.* Vol.6, Parts 3, pp.423-448.
- Foo, M.H., Shuy E.B. and Chen, C.N. (1995). "Entrainment across a density interface inside a flume compartment," *J. Hyd. Res.* Vol.33, No.2, pp.181-196.
- Keulegan, G.H. (1949). "Interfacial instability and mixing in stratified flows," RP2040, *US Nat. Bureau of Standards*, Vol.43, pp.487-500.
- Rajaratnam, N. and Subramanyan, S. (1986). "Plane turbulent denser wall jets and jumps," *J. Hyd. Res.* Vol.24, No.4, pp.281-296.
- Richardson, L.F. (1920). "The supply of energy from and to atmosphere," *Proc. R. Soc., London*, A97, pp.354-373.